

文章编号: 1007-4627(2010)02-0182-05

# $\gamma$ 辐射多层组合屏蔽的蒙特卡罗方法模拟及其论证\*

林卿<sup>1</sup>, 杨永栩<sup>1</sup>, 何云<sup>1, #</sup>, 马玉刚<sup>2</sup>, 曾思良<sup>3</sup>

(1 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;

2 吉林大学原子核科学与技术研究中心, 吉林 长春 130021;

3 北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室, 北京 100088)

**摘要:** 应用蒙特卡罗(MC)方法通用软件(MCNP4B 程序)建立多层组合模型, 模拟计算了  $\gamma$  辐射非均匀屏蔽的问题, 比较研究各种组合方法以确定最佳的方案。同时对模拟结果与理论计算、实验测量三者进行综合分析, 说明了三者结论的一致性, 也说明了用 MC 方法来模拟非均匀屏蔽的可行性和多层组合屏蔽设计的实际意义。

**关键词:** 非均匀屏蔽; MCNP; 积累因子; 蒙特卡罗方法

**中图分类号:** TL328      **文献标识码:** A

## 1 引言

核技术是一门综合性的现代技术科学, 放射性核物理已成为核科学最具活力的前沿研究领域之一<sup>[1]</sup>。随着人类大规模利用原子能, 反应堆的设计和建造日益重要, 而在设计核装置时辐射防护问题更具有特别重要的意义<sup>[2, 3]</sup>。

$\gamma$  辐射屏蔽问题的关键是源的特点、辐射能量、屏蔽物质和屏蔽体的有效厚度。要得到屏蔽效果与这些参数指标之间的定量的函数关系, 如果用实验室试验的方法, 就要连续地, 至少是小间隔地改变各参数值, 从而定出定量的各关系曲线, 这势必要消耗大量的实验材料和进行长时间的多次试验。这样的方法不仅效率低下, 浪费大量的人力和物力, 数据的处理和分析也十分麻烦, 而且在种种不定因素的干扰下, 很难得到理想的结果。而应用蒙特卡罗(MC)方法在计算机上进行模拟实验就可以避免这些不便之处<sup>[4-6]</sup>。

## 2 多层组合屏蔽设计与 MCNP 模拟

### 2.1 非均匀屏蔽设计原理与 MC 方法

在实际反应堆中使用的屏蔽<sup>[7]</sup>由两层或三层钢

中间充满水而组成, 对中子和  $\gamma$  射线的屏蔽都非常有效(如图 1)。在一个由轻、重材料两层组成的屏蔽中, 其  $\gamma$  射线的能谱和衰减, 与轻材料在重材料前或后很有关系。

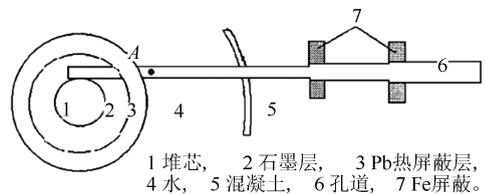


图 1 中国核动力研究院脉冲堆中的组合屏蔽

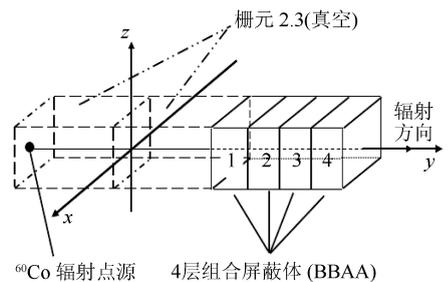


图 2 多层组合屏蔽的立体图

基于统计学模型的 MC 方法可解任意三维复杂几何系统内的粒子输运问题, 具有真实模拟粒子轨迹的特点, 因而被广泛用于输运计算和反应堆临界

\* 收稿日期: 2009-07-06; 修改日期: 2009-10-12

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10865002); 广西自然科学基金资助项目(0991092); 广西研究生教育创新项目(2009106020702M39)

作者简介: 林卿(1981-), 男(汉族), 海南琼海人, 硕士生, 从事粒子输运 MCNP 模拟研究; E-mail: elinqing@126.com

# 通讯联系人: 何云, E-mail: hy@gxnu.edu.cn

安全分析。

## 2.2 多层组合屏蔽设计的建模

MCNP 程序<sup>[8,9]</sup>是大型粒子输运 MC 程序,它具有超强的几何处理能力,适应多种问题的计算。为计算和讨论多层组合屏蔽性能的方便,本文建立多层组合屏蔽的几何模型(如图 2)。

## 3 非均匀组合屏蔽的模拟与分析

### 3.1 多层组合屏蔽的设计方法

本文具体模拟研究了下述代表性组合:(1)非金属-非金属(C-Si);(2)非金属-金属(B-Al);(3)金属-金属(Li-Pb)和(Fe-Pb)。同时研究不同组合方法的多层屏蔽体,由两种材料组成 4 层组合屏蔽的排列顺序:(1)轻轻重重(AABB);(2)重重轻轻

(BBAA);(3)轻重轻重(ABAB);(4)轻重重轻(ABBA);(5)重轻轻重(BAAB);(6)重轻重轻(BABA)。

采用比较有代表性的  $\gamma$  辐射<sup>60</sup>Co 点源,而对屏蔽体的屏蔽效果最好评价莫过于其吸收率或透射率<sup>[10]</sup>,选用透射率作为评价指标。

### 3.2 组合屏蔽性能(不同<sup>60</sup>Co 源)的模拟结果

利用 MCNP-4B 程序模拟同一厚度(40 cm)的 4 层组合屏蔽在不同能量<sup>60</sup>Co 源(0.661, 0.821, 0.992, 1.173 和 1.333 MeV)照射下的防护性能,模拟所跟踪光子总数为 100 万,相对误差  $R$  均在 0.03% 以内, $R < 0.05\%$ (MCNP 程序所建议的  $R$  值),FOM 趋于固定值。图 3 为非均匀屏蔽(C-Si, B-Al, Li-Pb)在不同组合方法下的性能比。

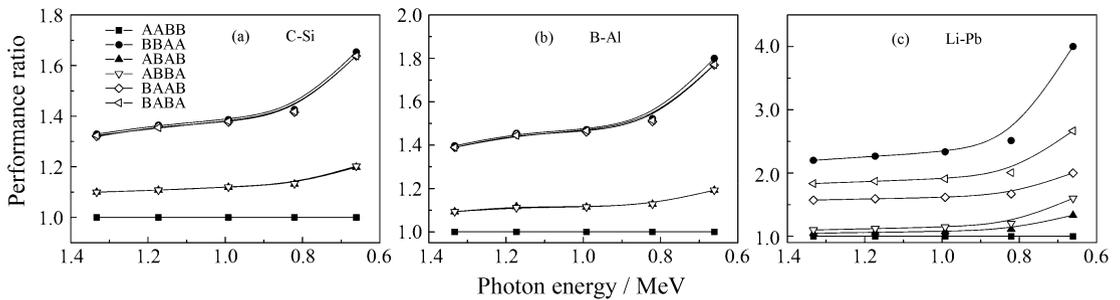


图 3 各种组合屏蔽(C-Si, B-Al, Li-Pb)性能比与源能量的关系

在图 3 中,当辐射源能量从 0.661 MeV 增加到 1.333 MeV 时,不同组合非均匀屏蔽性能比有减小的趋势,但是比值始终都大于 1(BBAA > BABA > BAAB > ABBA > ABAB > AABB)。从模拟结果看出,Pb 对高能  $\gamma$  射线的屏蔽性能很好。同时屏蔽中应该放些俘获截面很大、但只放出很软  $\gamma$  射线或电子的物质,通常选择 B 或 Li。从长期观点来看,高质量数元素的碳化物、硼化物防护效果比较好。因此本文所选择的组合(C-Si), (B-Al)和(Li-Pb)很好地代表了实际非均匀屏蔽设计中所采用的材料。

在实际设计屏蔽体时,不仅要选择合适材料,还考虑材料的合理布置。由于装置的屏蔽空间较小,同样厚度屏蔽体放置得越靠近辐射源时所占体积越小,因此含原子量大的元素材料尽可能布置靠近辐射源。移动装置防护层大多数是采用由重的和轻的元素组成非均匀组合屏蔽:Fe-水防护层、Pb-聚乙烯和 Fe-石墨防护层,这也说明了组合(重材料

+轻材料)屏蔽设计的实际意义。

### 3.3 组合屏蔽性能(不同厚度)的模拟结果

利用 MCNP-4B 程序模拟不同厚度的 4 层组合屏蔽在 1.333 MeV <sup>60</sup>Co 源照射下的防护性能,模拟所跟踪光子总数为 100 万,相对误差  $R$  均在 0.03% 以内。图 4 为非均匀屏蔽(C-Si, B-Pb, Fe-Pb)在不同组合方法下的性能比。

在图 4 中,当组合屏蔽厚度从 4 cm 增加到 36 cm 的过程中,各种组合方法与 AABB 组合性能比从 1 倍扩大到几倍不等。随着厚度增加时各种不同组合方法之间性能比差距加大。这 6 种组合方法的模拟结果是 BBAA > BABA > BAAB > ABBA > ABAB > AABB。由于核反应堆工作时从活性区产生出相当于 100—1000 亿倍最大允许剂量的辐射流(中子和  $\gamma$  射线等),因此反应堆外部都设有很厚的屏蔽层。例如,我国秦山核电站核反应堆安全壳的厚度为 1 m,在安全壳内还修建了一道 2 m 厚的屏

蔽墙。而屏蔽层厚度取决于反应堆的功率，有时达 5—7 m 以上。

从图 4 中也看出，如果单个屏蔽材料性能之间差距越大，采用(重+轻)组合设计的防护效果就越

好。例如，压水反应堆使用的屏蔽是由两层或三层钢中间充满水而组成。随着屏蔽厚度的增加，非均匀组合屏蔽(重+轻)设计具有优势，因此多层屏蔽设计理念被应用于非均匀屏蔽设计中。

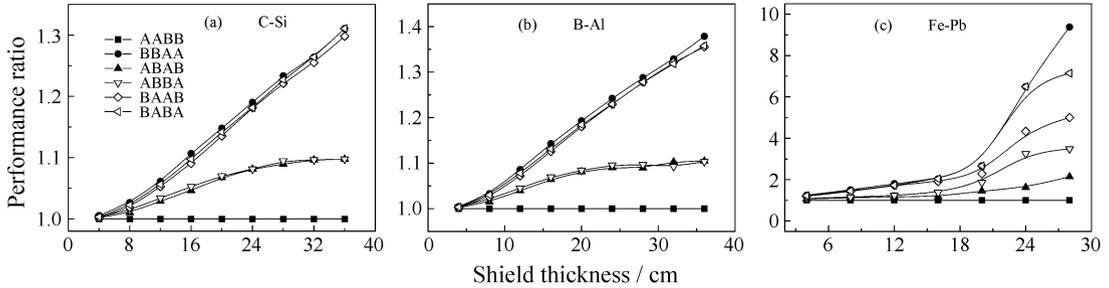


图 4 各种组合屏蔽(C-Si), (B-Al), (Fe-Pb)性能比与厚度的关系

## 4 组合屏蔽性能的计算、测量与分析

### 4.1 多层组合屏蔽性能的理论计算

为了研究屏蔽体的性能，可以通过计算其积累因子  $B$  来判断。积累因子决定于  $\gamma$  辐射的起始能量  $E_0$ ，物质的厚度  $X_0$  以及其原子序数  $Z_0$ 。

当屏蔽体由数种元素构成时，计算  $\gamma$  射线的穿透十分复杂。在间隔排列的材料层组成的屏蔽中， $\gamma$  射线的衰减可以利用  $\gamma$  粒子在前一层边界上的微分角分布逐层进行计算。对于两种或两种以上元素的组合屏蔽，在实验的基础上可以归纳出非均匀防护屏蔽积累因子的计算公式：

$$B_{\text{多层组合屏蔽}} = \sum_{n=1}^N B_n \left( \sum_{i=1}^n u_i x_i \right) - \sum_{n=2}^N B_n \left( \sum_{i=1}^{n-1} u_i x_i \right)。$$

屏蔽由  $n$  层不同材料组成。上式中  $x_i$  为第  $i$  层屏蔽材料的厚度， $u_i$  为线衰减系数。

为了简化理论计算的过程<sup>[11]</sup>，利用以上所提出的计算方法对以 Pb+Fe 和 Fe+Pb 为代表的两层组合屏蔽积累因子进行理论计算(如图 5)。

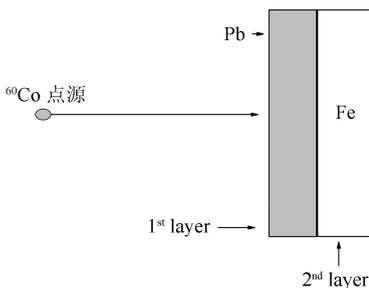


图 5 理论计算所采用的源与双层组合屏蔽立体图

计算范围取  $E_0$  (0.5—6.0 MeV)，厚度按自由射程长度  $\lambda$  计，同时分两种类型来计算：(1)源的能量变化时，组合屏蔽积累因子的变化；(2)材料厚度变化时，组合屏蔽积累因子的变化。表 1 给出了两种组合屏蔽积累因子的理论计算值。

表 1 双层组合屏蔽 Pb+Fe 和 Fe+Pb 积累因子的理论计算值

$\gamma$ 源能量/ MeV	靠近放射源一边的材料厚度 靠近探测器一边的材料厚度 / $\lambda$				
	1	2	4	8	10
0.5	2.46	4.39	10.11	23.40	43.58
	(1.42)	(1.69)	(2.00)	(2.65)	(2.73)
1.0	2.56	4.89	12.18	30.80	60.59
	(1.69)	(2.26)	(3.02)	(4.81)	(5.86)
2.0	2.45	4.28	10.37	26.54	52.76
	(1.76)	(2.51)	(3.66)	(6.87)	(9.00)
3.0	2.08	3.61	8.53	16.09	45.10
	(1.68)	(2.43)	(2.75)	(8.44)	(12.30)
4.0	1.84	3.03	6.82	17.73	38.68
	(1.56)	(2.25)	(3.61)	(9.80)	(16.30)
6.0	1.58	2.41	5.08	13.83	33.41
	(1.40)	(1.97)	(3.34)	(13.80)	(32.70)

在表 1 中组合(Pb+Fe)的积累因子总是大于组合(Fe+Pb)，即(Pb+Fe)防护性能优于(Fe+Pb)。而随着屏蔽厚度增加，它们性能之间的差距增大，组合(重+轻)设计就更能优化屏蔽体的性能。

在  $\gamma$  射线对双层组合屏蔽的穿透实验(如图 5)中互换 Fe 片与 Pb 片位置,  $\gamma$  射线的剂量减弱数量发生了显著的变化。通过理论计算得到 Pb+Fe(Pb 片靠近放射源)组合与 Fe+Pb(Fe 片靠近放射源)组合在不同厚度下的屏蔽性能比(如图 6)。从图 6 中可以看到, 在 0.5 MeV 辐射源照射下, 当组合屏蔽厚度是 2 ux 时, 两种组合 Pb+Fe(重轻)与 Fe+Pb(轻重)屏蔽性能比是 1.73 倍, 但是随着厚度增加到 20 ux 时, 两者防护性能比高达 15.97 倍。而 1 MeV 辐射源照射下, 当组合屏蔽厚度从 2 ux 增加到 20 ux 时, 两者的防护性能比也从 1.52 倍扩大到 10.34 倍。

同时当辐射源能量从 0.5 MeV 增加到 6.0 MeV 时, 两者防护性能比有减小的趋势, 但是性能比始终大于 1, 说明了组合(重+轻)防护性能优于组合(轻+重), 即 BBAA > BABA > BAAB > ABBA > ABAB > AABB。特别是在设计高厚度的非均匀屏蔽中, 组合(重+轻)设计能优化屏蔽体的性能。

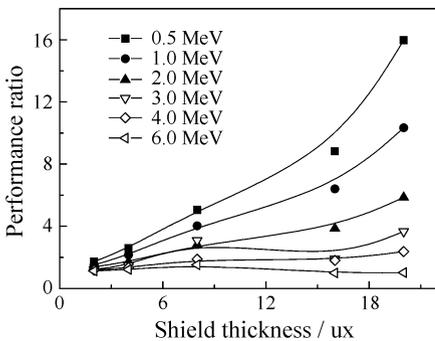


图 6 Pb+Fe(重轻)与 Fe+Pb(轻重)屏蔽性能比

#### 4.2 多层组合屏蔽的实验测量与分析

前苏联的布罗杰尔<sup>[12]</sup>和基迈尔<sup>[13]</sup>分别进行的  $\gamma$  射线对非均匀(两层)屏蔽体的穿透实验都证实了: 随着材料厚度增加时, 防护组合(重材料+轻材料)的屏蔽性能优于防护组合(轻材料+重材料)。同时韩国原子能研究所也设计了同一理念的双层组合辐射防护门<sup>[14]</sup>。在此列举组合屏蔽积累因子实验数据( $\gamma$  源能量为 1.25 MeV)与我们计算得到的理论数据进行对比分析(表 2)。从表 2 可以看出, 同一辐射源照射下, 当组合屏蔽厚度从 2 ux 增加到 8 ux 时, 实验测量出两者防护性能差距从 1.28 倍扩大到 1.82 倍。理论计算出两者防护性能差距从

1.48 倍扩大到 3.70 倍。理论计算数据与实验数据的变化趋势是一致的, 组合(Pb+Fe)防护性能优于组合(Fe+Pb)。影响理论计算与实验数据之间的误差有两个因素: 屏蔽层的厚度不大, 探测器在软能量区域的“硬度效应”<sup>[15]</sup>。以上实验研究所用的放射源和测试材料, 与本文所模拟的实验条件一致, 可作为本文模拟结果的实验验证。

表 2 双层组合屏蔽 Pb+Fe(上)和 Fe+Pb(下)积累因子(实验值与计算值)比较

数据测量条件	靠近放射源的材料厚度 / 靠近探测器的材料厚度 / $\lambda$		
	1/1	2/2	4/4
实验值 <sup>[13]</sup>	2.3	3.5	7.5
	1.8	2.3	4.1
计算值	2.53	4.74	11.73
	1.71	2.32	3.17

## 5 结论

本文对比研究了各种组合方法的优劣, 进而确定了最佳方案。同时对非均匀防护屏蔽的模拟结果与理论计算、实验测量三者进行综合分析, 说明三者结论的一致性, 也说明了用 MC 方法来模拟非均匀组合屏蔽的可行性和高厚度组合屏蔽设计的实际意义。但是由于非均匀屏蔽的设计物理与工程问题错综复杂, 如结构材料的辐射损伤问题<sup>[16]</sup>, 所以在设计非均匀屏蔽时应先做实验和模拟研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Wang Jinchuan, Xiao Guoqing, Guo Zhongyan, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**(1): 84(in Chinese). (王金川, 肖国青, 郭忠言等. 原子核物理评论, 2005, **22**(1): 84.)
- [2] Shultis J K, Faw R E. Radiation Shielding. American Nuclear Society, LaGrange Park. IL. 2000.
- [3] Farkas G, Domonkos P, Slugen V, *et al.* Computational Materials Science, 2006, **36**: 121.
- [4] Ding Aiping, Li Ying, Lu Lei, *et al.* Nuclear Physics Review, 2006, **23**(2): 130(in Chinese). (丁爱平, 李莹, 卢磊等. 原子核物理评论, 2006, **23**(2): 130.)
- [5] Su Youwu, Zhu Xiaolong, Li Wuyuan. Nuclear Physics Review, 2005, **22**(2): 198(in Chinese). (苏有武, 朱小龙, 李武元. 原子核物理评论, 2005, **22**(2):

- 198.)
- [6] Krsti D, Nikezi D. *Computer Physics Communications*, 2007, **176**: 33.
- [7] Jiang Xinbiao, Chen Da, Xie Zhongsheng, *et al.* *Computation Physics*, 2001, **18**(3): 285(in Chinese).  
(江新标, 陈达, 谢仲生等. *计算物理*, 2001, **18**(3): 285.)
- [8] Judith F. Briesmeister. MCNP-A General Monte Carlo N-Partical Transport Code. USA: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [9] Zhang Jiansheng, Cai Yong, Chen Niannian. *Nuclear Physics Review*, 2008, **25**(1): 48(in Chinese).  
(张建新, 蔡勇, 陈念年. *原子核物理评论*, 2008, **25**(1): 48.)
- [10] Qi Huirong, Xiao Guoqing, Wang Jinchuan, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2005, **22**(1): 94(in Chinese).  
(祁辉荣, 肖国青, 王金川等. *原子核物理评论*, 2005, **22**(1): 94.)
- [11] George C B. *Annals of Nuclear Energy*, 2006, **33**: 236.
- [12] Бродер Д Л, Каюрино Ю П, Ктузов А А. *Atomic Energy*, 1962, **4**(4): 410(in Chinese).  
(布罗杰尔, 卡尤林, 库图佐夫. *原子能*, 1962, **4**(4): 410.)
- [13] Кимепъ Л Р. *Atomic Energy*, 1961, **3**(6): 519(in Chinese).  
(基迈尔. *原子能*, 1961, **3**(6): 519.)
- [14] Hee Seongpark, Sung Kyunkim, Kune Woolee, *et al.* *Annals of Nuclear Energy*, 2008, **35**: 1117.
- [15] Кухтевич В И. *Atomic Energy*, 1959, **4**(2): 113(in Chinese).  
(库赫捷维奇. *原子能*, 1959, **4**(2): 113.)
- [16] Wang Zhiguang. *Nuclear Physics Review*, 2006, **23**(2): 155(in Chinese).  
(王志光. *原子核物理评论*, 2006, **23**(2): 155.)

## Simulation and Verification of $\gamma$ -multi-layer Shielding with Monte Carlo Method<sup>\*</sup>

LIN Qing<sup>1</sup>, YANG Yong-xu<sup>1</sup>, HE Yun<sup>1, #</sup>, MA Yu-gang<sup>2</sup>, ZENG Si-liang<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> *Department of Physics, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;*

<sup>2</sup> *Nuclear Science and Technology Research Center, Jilin University, Changchun 130021, China;*

<sup>3</sup> *Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)*

**Abstract:** In this paper, the multi-layer model was established to calculate  $\gamma$ -radiation non-uniform shielding problem, and various combinations of methods were investigated to determine the optimal option. At the same time, the comprehensive analysis of the simulation results, the theoretical calculation and the experimental measurements show that the consistency among them. Practical significance is also shown that the application of Monte Carlo method to simulate the non-uniform shielding feasibility and multi-layer shielding design.

**Key words:** non-uniform shielding; MCNP; buildup factor; Monte Carlo method

\* **Received date:** 6 Jul. 2009; **Revised date:** 12 Oct. 2009

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10865002); Natural Science Foundation of Guangxi(0991092); Innovation Project of Guangxi Graduate Education(2009106020702M39)

# **Corresponding author:** He Yun, E-mail: hy@gxnu.edu.cn